

Modelo de difusión de cloruros en probetas cilíndricas de hormigón armado sumergidas en agua sintética

Model chloride diffusion in concrete cylindrical specimens immersed in synthetic water

Candelaria Tejada Tovar^{*}; Angel Villabona Ortiz; Yurley Paola Villabona Durán

Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena, sede Piedra de Bolívar, Calle 30 No 49B-152, Barrio Zaragocilla, Cartagena, Colombia

*ctejabat@unicartagena.edu.co

Fecha Recepción: 12 de diciembre de 2012

Fecha Aceptación: 08 de junio de 2013

Resumen

La barra de refuerzo en el interior del hormigón es susceptible a la corrosión cuando la penetración de cloruro del agua de mar en la superficie del acero es superior al contenido de cloruro crítico, acelerando el proceso de corrosión y afectando de esta manera la integridad del acero y el hormigón. El presente trabajo realiza unas pruebas preliminares *ex situ* del fenómeno de difusión de iones cloruros determinando coeficientes efectivos de difusión, aplicando la segunda ley de Fick, para calcular la concentración de cloruros y realizar una comparación de estas concentraciones con las obtenidas experimentalmente a partir de las normas ASTM-114 y ASTM C-1218/C1218M-93. Para lo cual en el laboratorio de la universidad de Cartagena, se elaboraron 4 probetas cilíndricas de dos clases de cemento encontradas de mayor circulación en el medio de la construcción en la ciudad de Cartagena de Indias y dos diferentes relaciones de agua cemento: 0,4 y 0,5, que es lo recomendado para la construcción de muelles. Elaborando perfiles de concentración de cloruros versus distancia y encontrando el mejor modelo que ajuste los datos encontrados.

Palabras clave: *modelo matemático, concentración de cloruros, corrosión.*

Abstract

The reinforcement bar in the concrete interior is susceptible to corrosion when the penetration of chloride from seawater in the steel surface is superior to the critic chloride content, accelerating the corrosion process thus affecting the steel and concrete integrity. The present project Preliminary tests performed a study Out of the site of diffusion phenomenon of the chloride ions, determining the effective diffusion coefficients, applying Fick's Second Law to calculate the concentration of chloride and make a comparison of them with the experimental data obtained from the norms ASTM-114 and ASTM C-1218/C1218M-93. To which in the laboratory of the University of Cartagena for this purpose, 4 cylindrical specimens were made of two types of cement found to be within the most used cement in the construction environment in the city of Cartagena de Indias, and two different water-cement relations: 0.4 and 0.5 which is the recommendation for dock construction. Developing chloride concentration profiles against distance and finding the best model that fits the found data.

Keywords: *mathematical model, chloride concentration, corrosion.*

Introducción

Por ser resistente y de bajo costo el hormigón armado es muy utilizado, lo que ha dado lugar a su uso generalizado para la construcción de diferentes estructuras como muelles [1], por ser considerado resistente a las abrasiones marinas [2], sin embargo, la corrosión del acero de refuerzo en el hormigón, es una de las principales causas del deterioro de estructuras de hormigón armado, en ambientes marinos [3].

Con frecuencia el proceso de corrosión de estructuras de hormigón armado causa graves daños y perjuicios, haciendo que la vida útil de una estructura disminuya debido a la influencia del medio ambiente. Son diversos los factores que afectan el deterioro del metal en el hormigón, entre los que se encuentran las proporciones de los contenidos, la compactación, la homogeneidad, el espesor del hormigón, el refuerzo, el estado de la superficie y la humedad ambiental; además, la presencia de la tensión mecánica en el acero, las corrientes de interferencia, el contacto galvánico entre dos metales, la presencia de iones agresivos (Cl^- , SO_4^{2-} , etc) y el CO_2 atmosférico (carbonatación) [4].

La mayoría de las aguas de mar presentan una composición química uniforme, donde se caracteriza la presencia de un 3,5%p de sales solubles. Por lo tanto, el hormigón expuesto a un ambiente marino puede deteriorarse debido a los efectos combinados de la acción química de estos constituyentes del agua de mar sobre los productos de hidratación del cemento, ocasionando la corrosión de las armaduras, además de la erosión física debida a la acción de las olas y de las partículas en suspensión [5]. Las principales sales que afectan el proceso de corrosión en estructuras de hormigón armado expuestas al ambiente marino son aquellas que tienen el ion cloruro.

En los últimos años, numerosas estructuras de hormigón armado en todo el mundo han sufrido un rápido deterioro. Por lo tanto, la durabilidad de las estructuras de hormigón, especialmente los expuestos a ambientes agresivos, es motivo de gran preocupación [6]. Uno de los principales motivos del proceso de corrosión en el hormigón es la entrada de iones cloruros que se da por la exposición en ambientes marinos y el uso generalizado por sales de deshielo, debido a los iones cloruro se ha llegado al concepto de nivel de umbral de cloruro (CTL), definido como el contenido de cloruro presente en la profundidad del acero a

partir del cual la corrosión inicia y por lo general se presenta como el contenido de cloruro libre o el porcentaje de cloruros totales con respecto al peso del cemento [7-9]. Los cloruros libres o cloruros solubles no están fijados de forma química o física y pueden ser transportados fácilmente al interior del hormigón, por capilaridad, bajo efectos de las variaciones de la humedad o por difusión en el hormigón bajo efectos de gradientes de concentración a partir del agua de mar, mientras que a los cloruros totales se les conoce como la suma de cloruros solubles y combinados, los cloruros combinados se encuentran en el hormigón físicamente absorbidos sobre las paredes sólidas de los poros o químicamente fijados por reacción con ciertos compuestos de cemento [10].

El control de la corrosión del acero en las estructuras de concreto reforzado siempre ha sido un gran reto para los ingenieros civiles de todo el mundo [11]. Uno de los parámetros más significativos para el diseño y evaluación de las estructuras de hormigón es el contenido crítico de cloruros ($C_{\text{crítico}}$) [12], los contenidos de cloruros críticos varían entre 0,17 y 2,2%p respecto al porcentaje total de Cl de cemento la explicación de este rango se explica en la Tabla 1 [13] y este parámetro se aplica para cloruros solubles y cloruros totales. En ingeniería el $C_{\text{crítico}}$ es el contenido de cloruros asociados visibles en el deterioro de las estructuras de hormigón armado [7], debido a que la corrosión iniciada por los iones cloruro es considerada como el ataque más grave y la principal causa de la corrosión prematura en estructuras de hormigón armado [14], por esta razón se deben tener en cuenta los métodos utilizados para determinar $C_{\text{crítico}}$ de cloruros como son el potenciómetro basado en la polarización de la armadura y el análisis de la variación de la concentración crítica de cloruros teniendo en cuenta los cloruros totales y solubles en el hormigón [15]. Al mismo tiempo, es necesario determinar la resistencia del hormigón a partir del nivel de umbral y el tiempo de corrosión.

Son varios los métodos utilizados para determinar el contenido de cloruros: Mohr y Volhard, nefelométrico o el de electrodo selectivo, pero la preparación de la muestra en todos es bastante similar [10].

Para determinar la migración del ion cloruro en la probeta de hormigón se usa el método de perfil de concentración de cloruros, para lo que se debe determinar contenido de cloruros en la superficie y a diferentes profundidades, por lo que se toma

una muestra de polvo y se aplica la norma ASTM-114: Método estándar para el análisis de cloruros totales, así como la norma ASTM C-1218/C 1218M-93: Método estándar para el análisis de cloruros solubles [16].

Tabla 1. Riesgo de corrosión de la barra de refuerzo con relación a los rangos de concentraciones críticas de iones cloruros totales y solubles[16].

Concentración de iones cloruros a la profundidad del acero(%p de cemento)	Riesgos para la iniciación de la corrosión
<0,4	Insignificante
0,4-1,0	posible
1,0-2,0	probable
>2,0	seguro

La velocidad de penetración de los iones cloruro al hormigón puede ser establecida mediante la determinación del coeficiente efectivo de difusión de cloruros (Def). Este parámetro puede ser determinado a partir del análisis matemático de perfiles de concentración de cloruros obtenidos de muestras de hormigón. Los procesos difusivos en estado transitorio están gobernados por la segunda ley de Fick. Cuando las probetas presentan una geometría cilíndrica, la penetración de cloruros se produce mayormente en forma radial, el coeficiente de difusión se realiza a partir de la solución de la segunda ley de Fick que se expresa en coordenadas cilíndricas.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r Def \frac{\partial C}{\partial r} \right] \quad (1)$$

Donde C y t son la concentración de cloruros y el tiempo respectivamente y r la coordenada radial.

Las condiciones de contorno correspondientes a la superficie de la probeta dependen del tipo de exposición a las cuales están sometidas. En el caso de las probetas inmersas en la solución salina, la concentración superficial de cloruros (C_s) puede considerarse como constante en el tiempo. Por su parte, el valor de C_s en las probetas expuestas al ambiente marino se incrementa en función del tiempo debido a la acumulación de cloruros provenientes del medio externo en la superficie del hormigón.

La difusión de cloruro está influenciada por muchos factores que incluyen la composición del hormigón y su porosidad [17]. Además de

la absorción debida a una acción capilar, la migración en un campo eléctrico, la difusión bajo la influencia de un gradiente de concentración, un flujo inducido por la presión y la acción mecha cuando la absorción de agua y la difusión del vapor de agua se combinan [18].

Por consiguiente, es necesario desarrollar métodos, que ayuden a simular el proceso de entrada del ion cloruro y de predecir los perfiles de concentración de cloruro para ayudar a evaluar la condición de servicio para estructuras de hormigón armado [19]. El presente trabajo tiene como finalidad presentar pruebas preliminares de un experimentación en *ex situ* de cuatro probetas de hormigón sumergidas en solución de cloruro de sodio en el laboratorio de la Universidad de Cartagena para presentar un modelo matemático que ayude a predecir las características antes mencionadas.

Parte experimental

Para el desarrollo del experimento se utilizaron 4 probetas cilíndricas de hormigón armado, dos tipos de resistencia (dos relaciones agua-cemento). El diseño se aplica para la inmersión en la solución de cloruro de sodio. Como se puede observar en la Tabla 2.

Preparación de la solución salina

La solución de iones cloruros se preparó a partir de cloruro de sodio con la concentración del agua del mar de Cartagena de Indias (11,1gr/l).

Tabla 2. Diseño experimental

Marca de cemento	Resistencia (Relación/agua/cemento)
A	3000 PSI (A/C : 0,5)
	4000 PSI (A/C : 0,4)
B	3000 PSI (A/C : 0,5)
	4000 PSI (A/C : 0,4)

Preparación de las probetas

Se prepararan 4 probetas con cemento clase I, con dos marcas de cemento encontradas en el medio de la construcción de mayor circulación en la ciudad de Cartagena de Indias, para dos tipos de resistencia: 3000 y 4000psi (ver Figura 1). Teniendo en cuenta la norma técnica colombiana NTC 550. Con las composiciones químicas y físicas que se relacionan en las Tablas 3 y 4.

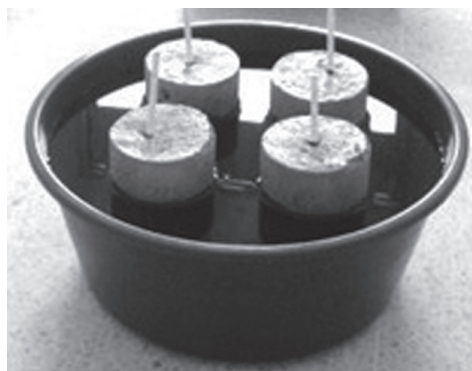


Figura 1. Montaje experimental.

Tabla 3. Composición química de los cementos en estudio.

Parámetros químicos máximo (%p)	Marca de cemento	
	A	B
Oxido de magnesio(MgO)	6,00	3,0
Trióxido de azufre(SO ₃)	3,5	3,0
Perdida por ignición	-	-
Residuo insoluble,RI	-	-
Aluminato tricálcico,C3A	15,00	<8

Fuente: datos obtenidos de las fichas técnicas del cemento utilizado.

Tabla 4. Composición física de los cementos en estudio.

Parámetros físicos	Marca de cemento	
	A	B
Fraguado inicial mínimo (min)	90	100
Fraguado final máximo (min)	360	260
Expansión autoclave, máximo (%)	0,80	0,20
Expansión en agua máximo (%)	0,02	0,20
Resistencia a 1 día mínimo (MPa)	12,0	-
Resistencia a 3 días mínimo (MPa)	24,0	13,0
Resistencia a 7 días mínimo (MPa)	-	17,0
Resistencia a 28 días mínimo (MPa)	43,4	28,0

Fuente: datos obtenidos de las fichas técnicas del cemento utilizado.

Las cantidades de materiales se obtuvieron teniendo en cuenta el diámetro y la altura del molde de los cilindros para ensayos, 15 y 30cm. Las probetas fundidas se sumergieron en una solución de cloruro de sodio.

Obtención de perfiles de concentración de cloruros

Se analizó un testigo de cada probeta cilíndrica, y se evaluó la concentración de cloruros a una distancia radial de 0,5, 1,0 y 2,0cm del borde hacia el centro, obteniendo perfiles de concentración de cloruros versus distancia en cm (ver Figura 2).

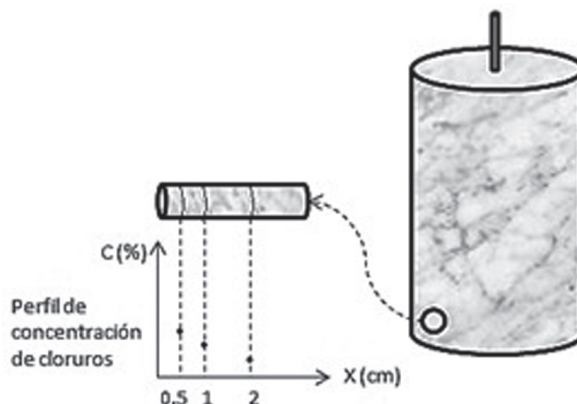


Figura 2. Esquema de la muestra del testigo de la probeta de hormigón.

Se analizaron testigos tomados de las probetas de hormigón inmersas en soluciones salinas en tiempos de 180, 360 y 520 días.

Hipótesis básicas del modelo

En el modelo propuesto se han considerado las siguientes restricciones y suposiciones:

- Se supone que en el proceso de corrosión del hormigón armado intervienen solamente los cloruros solubles, estando estos disueltos en el agua del poro.
- Se considera un elemento de forma geométrica simple, y que no existe corrosión galvánica con alguna parte de otra estructura de hormigón.
- Se asume que el hormigón tiene una distribución de poro homogénea a lo largo del mismo y se ignoran los efectos de agrietamiento.
- La actividad del ion cloruro y la temperatura se mantienen constantes con el tiempo y se desprecian los efectos de la carbonatación.
- Se asume que el proceso de difusión de los iones cloruro en el hormigón es unidireccional y en forma de curvas concéntricas de la superficie hacia el centro, cumpliendo la segunda ley de Fick en una dimensión para coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Def \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Bajo las siguientes condiciones de frontera:

$$t = 0; \quad C = 0$$

$$r = 0; \quad \frac{\partial C}{\partial r} = 0$$

$$r = r_0; \quad C = C_s(t)$$

El coeficiente de difusión, representado por Def , es dependiente del tiempo y de otras variables como la relación agua-cemento. La concentración en la superficie es una condición de frontera del sistema y se representa como un término $C_s(t)$ y se considera constante en el tiempo.

Modelo de difusión de los iones cloruros

Para la realización del modelo matemático se tuvo en cuenta la geometría cilíndrica presentada en las probetas y que la penetración de cloruros se ocasiona en forma radial, a partir de la Ecuación 2 desarrollada por Crank [20]:

$$C(r) = (C_s - C_o) \left[1 - \frac{2}{a} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} e^{-Def \cdot (\alpha_n)^2 \cdot t} \cdot \frac{J_0(r \cdot \alpha_n)}{J_1(\alpha_n) \cdot n} \right] + C_o \quad (3)$$

Donde a es el radio de la probeta, J_0 y J_1 las funciones de Bessel y α_n las soluciones positivas de J_0 .

Los valores de J_0 y J_1 , n y α son valores estándar de las funciones de Bessel.

Para la solución de esta ecuación se tuvo en cuenta un coeficiente de difusión dependiente del tiempo, así como una dependencia de la concentración de cloruros con respecto a las condiciones climáticas, reflejadas en la concentración superficial de estos. El algoritmo desarrollado a partir de esta ecuación permite que, tanto la expresión no lineal del coeficiente de difusión como la condición de frontera propuesta para la superficie, puedan ser consideradas en la generación del perfil de penetración de los iones cloruro como una función del tiempo. Con la ayuda de una hoja de cálculo en Excel se implementó este algoritmo con el fin de reproducir los resultados encontrados experimentalmente.

Para calcular el coeficiente de difusión Def se utilizó el modelo propuesto por los Ingenieros Ospina

y Lombo; se adoptó la siguiente ecuación como solución de la segunda ley de Fick. Conocidos los valores de C_x , C_s , t y x es posible despejar fácilmente Def [21].

$$C_x = C_s \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Def \cdot t}}} e^{-t^2} dt \right) \quad (4)$$

Introduciendo los datos en las siguientes unidades:

$$C_x \text{ y } C_s = [\% \text{ cloruros}]$$

$$x = [m]$$

$$T = [días]$$

$$Def = [m^2/días]$$

C_s es la concentración de la superficie, C_o es la inicial pero esta depende del tiempo es decir para 180 se tomó como la de la superficie pero para 360 se tuvo en cuenta la que se obtuvo a 180 días para esa distancia y así sucesivamente. Al igual que para calcular el valor de Def este se realizó mediante un algoritmo en una hoja de cálculo de Excel.

Resultados y Discusión

Perfiles de concentración de cloruros

Para la evaluación del grado de corrosión en las probetas de hormigón sumergidas en la solución salina, se construyó el perfil de difusión de cloruros, se tomaron tres mediciones de datos, una vez iniciado el experimento a 180, 360 y 510 días, tal como se relaciona a continuación.

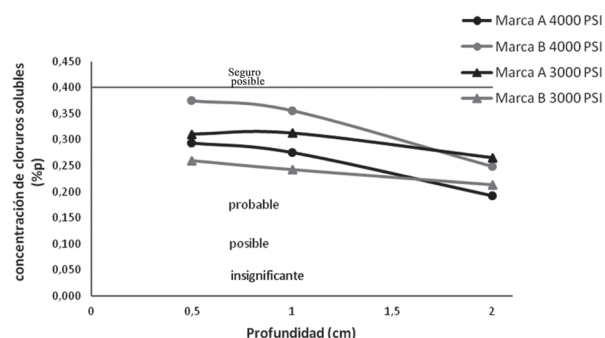


Figura 3. Perfiles de concentración de cloruros solubles experimentales a 180 días.

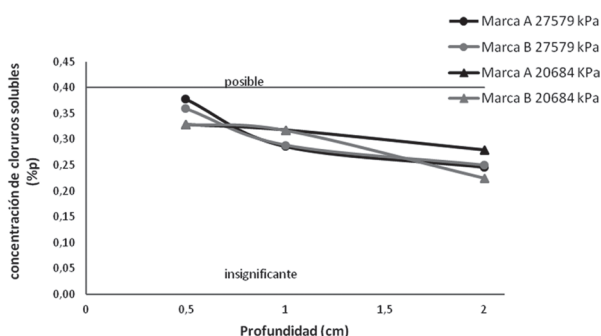


Figura 4. Perfiles de concentración de cloruros solubles experimentales a 360 días.

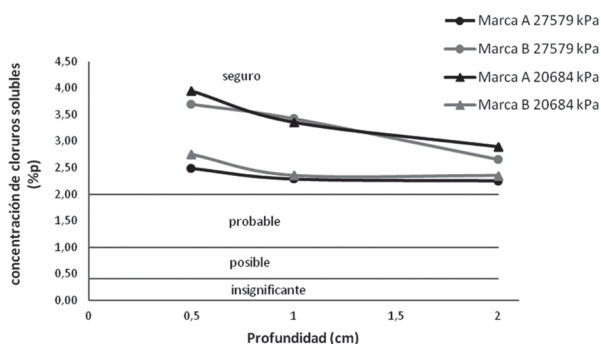


Figura 5. Perfiles de concentración de cloruros solubles experimentales a 510 días.

Como puede apreciarse en las Figuras 3, 4 y 5, los perfiles de las probetas inmersas en solución salina a 180 y 360 días presentan valores de concentración por debajo al nivel crítico de cloruros ($C_{\text{crítico}} \approx 1\%$), mientras que a 510 días presenta valores más elevados de concentración de cloruros, por encima del nivel crítico de concentración para provocar la corrosión del acero en el hormigón.

Determinación de perfiles de cloruros usando el modelo matemático propuesto

Teniendo en cuenta la Ecuación 3 desarrollada por Crank [20], se procedió a modificar esta ecuación a las condiciones experimentales diseñadas, de modo que la concentración de iones cloruro en función del radio $C(r)$ queda expresada como:

$$C(r) = (C_s - C_o) \left[1 - \frac{2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{Def(\alpha_n)^2 \cdot t}{r^2}} \cdot \frac{J_0 \cdot r \cdot (\alpha_n)^2}{J_1} \right] + C_o \quad (5)$$

A partir de esta ecuación se obtuvieron perfiles como los relacionados a continuación.

En la Figuras 6, 7 y 8, se observa que los datos obtenidos del modelado para las marcas A y B a resistencias de 3000 y 4000 en solución salina, se ajustan de forma adecuada al modelo de difusión, por lo cual, se puede decir que existe un alto nivel de correlación entre los datos encontrados experimentalmente y los obtenidos por el modelo de difusión propuesto manteniendo una tendencia muy similar a los perfiles de concentración experimentales, por lo tanto se puede constatar que existe una buena concordancia cualitativa.

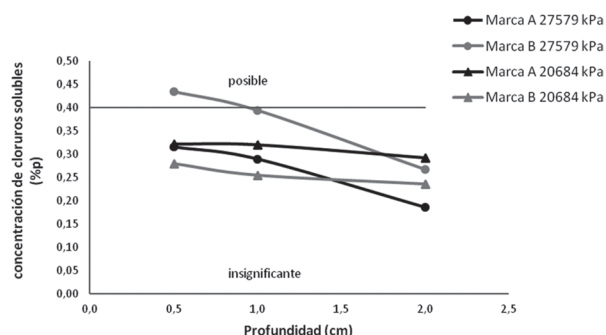


Figura 6. Perfiles de concentración de cloruros solubles calculados a 180 días.

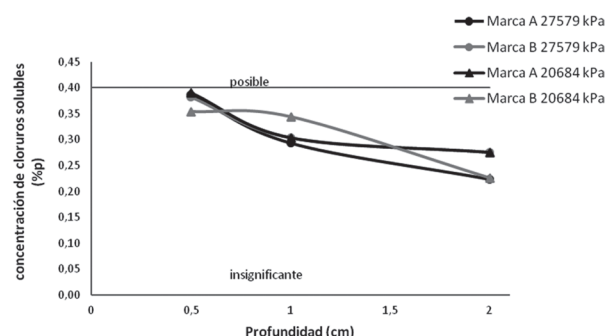


Figura 7. Perfiles de concentración de cloruros solubles calculados a 360 días.

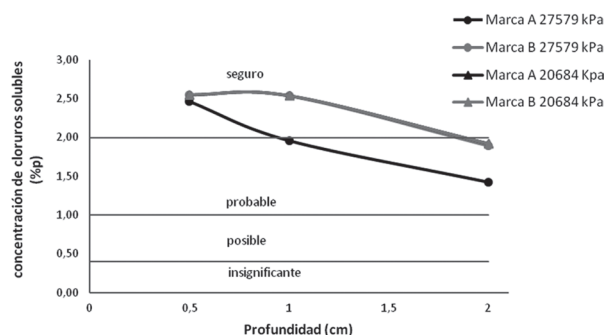


Figura 8. Perfiles de concentración de cloruros solubles calculados a 510 días.

Además, se encontró que a mayor tiempo de sumergidas las probetas, los datos experimentales y los del modelo tienden a ser diferentes, como se puede observar en las Figuras 5 y 8.

Conclusiones

Cartagena Indias por ser una ciudad costera, tiene un ambiente agresivo a las estructuras de hormigón presentes en muelles propios de la zona industrial, el ingreso de iones cloruro es considerado el factor principal de la corrosión en estas estructuras, convirtiéndose en un problema con efectos de tipo económico para las industrias, por lo que la presente investigación aporta una manera de cómo medir la migración de estos ayudando a evaluar este tipo de problemas.

De la determinación de perfiles de cloruros realizada para los diferentes tiempos (180 – 360 -510 días), se encuentra que para la marca A, la concentración de cloruros es mayor para el cemento menos resistente, pero para la marca B, la concentración de cloruros es mayor para el cemento más resistente. Además, la forma del perfil de concentración de cloruro que toma con el tiempo de inmersión depende de las condiciones ambientales, y puede cambiar en alto grado dependiendo de la calidad del hormigón.

Se obtuvo un modelo donde la tendencia de los datos en función del tiempo fue de tipo exponencial, tal como lo recomienda la literatura consultada. Los resultados obtenidos muestran la importancia de tener en cuenta los niveles de cloruros superficiales e iniciales, además de las variaciones de estas concentraciones al momento de estimar la vida útil del hormigón.

Los resultados obtenidos del ajuste de los datos experimentales para el modelo de difusión de perfiles de concentración de cloruros, a diferentes profundidades, a partir de coeficientes de difusión para cada probeta muestran niveles de correlación altos por lo que se pueden considerar satisfactorios.

Referencias

- [1] Pierre C. Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*. 2000;30:1349-59.
- [2] Hasan M, Mehdizadeh M. A Case Study on Corrosion in Concrete Floating Docks in Qeshm Port. *Procedia Engineering*. 2013;54:109–16.
- [3] Li L, Page C, Wang Y. Modelling of chloride ingress into concrete from a saline

environment. *Building and Environment*. 2005;40:1573–82.

- [4] Bitaraf M, Mohammadi S. Analysis of chloride diffusion in concrete structures for prediction of initiation time of corrosion using a new meshless approach. *Construction and Building Materials*. 2008;22(4):546-56.
- [5] Bermúdez M, Alaejos P. Permeabilidad a los cloruros del hormigón armado situado en ambiente marino sumergido. *CEDEX*. 2007;15–22.
- [6] Ji Y, Zhao W, Zhou M, Ma H, Zeng P. Corrosion current distribution of macrocell and microcell of steel bar in concrete exposed to chloride environments. *Construction and Building Materials*. 2013;47:104–10.
- [7] Angst U, Elsener B, Larsener CK, Vennesland O. Critical chloride content in reinforced concrete - A review. *Cement and Concrete Research*. 2009;39:1122-38
- [8] Dong Z, Shi W, Guo X. Initiation and repassivation of pitting corrosion of carbon steel in carbonated concrete pore solution. *Corrosion Science*. 2011;53:322–1330.
- [9] Ormellese M, Lazzari L, Goidanich S, Fumagalli G. A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete. *Corrosion Science*. 2009;51:2959–68.
- [10] Andrade C. Manual inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras, 1975.
- [11] Cao C, Cheung M, Chan B. Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate. *Corrosion Science*. 2013;69:97–109.
- [12] Bouteiller V, Cremona C, Baroghel V, Maloula A. Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time. *Cement and Concrete Research*. 2013;42:1456–67.
- [13] Castañeda A, Días N, González E, Martínez M, Corvo F. Influencia de la Penetración de Iones Cloruros en el Hormigón Armado a Diferentes Relaciones Agua/Cemento y Condiciones de Exposición. *CENIC Ciencias Químicas*. 2005;36:1-16.
- [14] Correia V, Barreto E, Silva K, Influence of cement type in reinforcement corrosion of mortars under action of chlorides. *Construction and Building Materials*. 2013;40:710–8
- [15] Alonso C, Sánchez M. Análisis de la concentración crítica de cloruros en la vida útil de las estructuras. *Anales de Mecánica*

- de la Fractura. 2009;2(26):519-24.
- [16] Angst U, Ronnquist A, Elsener B, Larsena C, Vennesland O. Probabilistic considerations on the effect of specimen size on the critical chloride content in reinforced concrete. *Corrosion Science*. 2011;53:177-87.
- [17] Tamimi A, Abdalla J, Sakka Z. Prediction of long term chloride diffusion of concrete in harsh environment. *Construction and Building Materials*. 2008;22(5):829-36.
- [18] Song H, Lee C, Ann K. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. *Cement and Concrete Composites*. 2008;30:113–21.
- [19] Conciatori D, Sadouki H, Brühwiler E. Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete. *Cement and Concrete Research*. 2008;38:1401–8.
- [20] Crank J, *Mathematics of diffusion*. 2 ed. Inglaterra. Oxford University Press; 1975.
- [21] Lizarazo J, *Ensayos tipicos en la determinación de la durabilidad del concreto*. Seminario ACI Ataque químico. 2008. Bogota, Colombia.